

**УДК 621.778.014**

**НИКОЛАЕВ В.А.**, докт.техн.наук, проф., ЗГИА, г. Запорожье

**ВАСИЛЬЕВ А.Г.**, ст.преподаватель, ЗГИА, г. Запорожье

**ВАСИЛЬЕВ А.А.**, аспирант, ЗГИА, г. Запорожье

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ-ВОЛОЧЕНИЯ ТОНКИХ ПОЛОС**

Приведены методика и результаты исследований процесса прокатки-волочения (ПВ) при деформации тонких полос в холостых валках в сравнении с процессом прокатки в приводных валках (ПРВ). Выполнен сравнительный анализ энергосиловых параметров процессов ПВ и ПРВ при прокатке тонких полос. Показана возможность и целесообразность использования процесса ПВ при деформации полос с небольшими обжатиями.

Ключевые слова: прокатка, прокатка-волочение, полоса, приводные валки, холостые валки, шероховатость поверхности, опережение, обжатие.

Наведені методика і результати досліджень процесу прокатки – волочіння (ПВ) при деформуванні тонких штаб у холостих валках у порівнянні з процесом прокатки в приводних валках (ПРВ). Виконано порівняльний аналіз енергосилових параметрів процесів ПВ і ПРВ під час прокатки тонких штаб. Показано можливість і доцільність використання процесу ПВ при деформуванні штаб з невеликими обтисками.

Ключові слова: прокатка, прокатка – волочіння, штаба, приводні валки, холості валки, шорсткість поверхні, випередження, обтиск.

The methods and results of rolling-drawing process researches (RD) in thin strips deformation in free rolls are proposed in this article. There results are given in comparison with rolling process in driven rolls (DR). the comparative analysis of power parameters of rolling drawing (RD) process and driven rolls (DR) process in thin strips rolling. The possibility and expedience of RD process usage in strips deformation with small reduction.

Key words: rolling, rolling – drawing, strip, driven rolls, free rolls, surface roughness, an advance forward creep, reduction.

*Введение.* В настоящее время актуальным является снижение энергосиловых параметров и повышение качества при прокатке полосовой стали. В частности при холодной прокатке полос. Улучшение указанных показателей может быть обеспечено снижением влияния контактных напряжений трения в очаге деформации.

*Состояние вопроса.* Одним из способов уменьшения влияния контактных касательных напряжений на непрерывных и реверсивных станах является применение процесса прокатки тонких полос в неприводных валках (процесс прокатка-волочение) [1-3].

Процесс холодной прокатки в неприводных рабочих валках небольшого диаметра в четырехвалковых или многовалковых клетях используют для получения тонких полос [4, 5]. В данном процессе рабочие валки не имеют электропривода, но получают энергию для деформации и транспортировки полос от опорных валков за счет контактного межвалкового взаимодействия. В связи с этим рабочие валки в этом про-

цессе можно лишь условно называть неприводными и поэтому характер течения металла по длине очага деформации подобен прокатке в приводных валках [4].

В некотором смысле неприводными являются валки (ролики) при деформации полосы волочением. В этом процессе валки (ролики) вращаются (получают энергию вращения) через полосу от натяжного устройства, а условия деформации полосы существенно отличаются от закономерностей течения металла при прокатке. Так, по данным [1] в процессе волочения в неприводных валках (роликах) (процесс прокатки - волочение) влияние контактных касательных напряжений существенно уменьшается, а коэффициент трения рекомендуют определять по выражению

$$f_{\text{ПВ}} = f_{\text{В}} \frac{\mu - 1}{2(\mu + 1)} = f_{\text{В}} \cdot k_{\text{ПВ}}, \quad (1)$$

где  $f_{\text{ПВ}}$  – приведенный коэффициент трения при прокатке – волочении;  $f_{\text{В}}$  – коэффициент трения при волочении в монолитной волоке;  $\mu$  – коэффициент вытяжки металла;  $k_{\text{ПВ}}$  – коэффициент уменьшения коэффициента трения  $f_{\text{В}}$ .

Как следует из выражения (1), коэффициент трения  $f_{\text{ПВ}}$  при  $\mu > 1$  всегда меньше величины  $f_{\text{В}}$ , что обуславливает снижение усилия деформации. В работе [2] отмечается, что приведенный коэффициент трения  $f_{\text{ПВ}}$ , представляющий собой отношение усилия волочения, затраченного на преодоление суммы контактных касательных напряжений в очаге деформации к нормальному усилию металла на валки (ролики), примерно на порядок меньше, чем при волочении в монолитной волоке. При прокатке – волочении, как и в процессе прокатки в приводных валках, в очаге деформации существуют зоны отставания и опережения [3, 6]. Угол критического сечения при волочении в неприводных роликах (валках) может быть определен из выражения [3]

$$\gamma = 0,5\alpha(1 + \rho / f_{\text{ПВ}}R); \quad (2)$$

$$\rho = f_{\text{Ш}} \cdot r_{\text{Ш}}, \quad (3)$$

а величину опережения  $S$  и скорость  $v_{\text{В}}$  вращения валков (роликов) определяют из выражений:

$$S = v_{\text{П}}/v_{\text{В}} - 1; \quad v_{\text{В}} = v_{\text{П}}/(1+S), \quad (4)$$

где  $\gamma$  – угол критического сечения;  $\alpha$  – угол контакта;  $R$  – радиус валков;  $\rho$  – радиус трения в шейках валков;  $r_{\text{Ш}}$  – радиус шейки;  $f_{\text{Ш}}$  – коэффициент трения в шейках;  $v_{\text{П}}$  – скорость движения полосы при протягивании.

При  $\rho \rightarrow 0$  отношение  $\gamma/\alpha$  не превышает величины 0,5 ( $\gamma/\alpha < 0,5$ ), что подтверждается экспериментальными исследованиями при прокатке в клети с одним неприводным (холостым) валком [7, 8]. В условиях несимметричной прокатки на холостом валке при  $\varepsilon > 0,2$  коэффициент трения в 1,75 раза, а усилие прокатки в 1,07 – 1,10 раза меньше, чем при симметричной прокатке в приводных валках, а отношение  $\gamma/\alpha \rightarrow 0,5$  и существенно больше, чем на приводном валке. В исследованиях [6] при прокатке полос с размерами в сечении 25×25мм перераспределение части обжатия с приводной клети (ПК) на неприводную клеть (НК) (при  $\mu = \text{const}$ ) в определенных условиях позволяет, за счет снижения влияния сил трения и напряжения течения металла, уменьшить мощность деформации в 1,3 – 1,55 раза по сравнению с прокаткой в одной клети типа ПК.

*Задачи исследований.* В связи с дальнейшим развитием теории и практики протягивания (волочения) в неприводных валках в работе решается задача получения оценки процесса прокатки-волочения (ПВ) при деформации тонких полос в сравнении с классическим процессом прокатки в приводных валках (ПРВ).

*Основная часть исследований.* Исследования выполняли в клети дуо с диаметром валков  $D \approx 51,8$  мм, при их окружной скорости  $v_B \approx 0,05$  м/с, шероховатость валков  $Ra$ , мкм: верх – 0,45; низ – 0,97. Прокатывали отожженные полосы алюминия марки АКЛП-ПТ-5Е толщиной  $H = 1,07$  мм и шириной  $B \approx 23,5$  мм с обжатием  $\varepsilon = 0,05-0,48$ . В приводных валках прокатывали первую часть каждой полосы длиной  $L \approx 500$  мм. После прокатной серии, клеть без привода переносили на горизонтальную волочильную установку [9] и при помощи приводного барабана протягивали вторую часть полосы со скоростью  $v_{П} = 0,05$  м/с в холостых валках. Такой способ прокатки обеспечивает одинаковые механические свойства полос в обоих процессах. Измеряли толщину до и после прокатки с точностью 0,01 мм, определяли ширину полосы с точностью 0,05 мм и опережение по керновым отметкам на верхнем ( $L_B$ ) и нижнем ( $L_H$ ) валках ( $L_B = 100,0$  мм;  $L_H = 99,0$  мм) и коэффициент вытяжки ( $\mu$ ) по керновым отметкам на полосе до и после прокатки. В стандартных условиях на прессе УГП-20/2 определяли усилия напряжения течения  $\sigma_T$  и предел прочности  $\sigma_B$  металла в зависимости от величины относительного обжатия (рис.1).

Усилие на валки определяли тензометрическими месдозами, а усилие протягивания (волочения) полосы в холостых валках измеряли переносным динамометром. Все измерительные устройства тарировали до и после процесса деформирования.

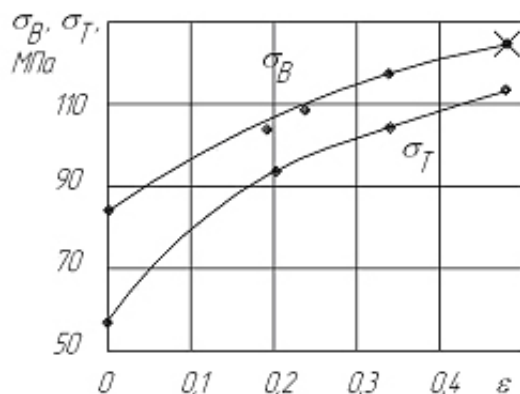


Рис.1. Предел прочности ( $\sigma_B$ ) и напряжение течения ( $\sigma_T$ ) алюминия марки А5Е с химсоставом, %: 0,09-0,1 Si; 0,21-0,35 Fe; Ti, Mn, Mg, Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Zr, Na, V в пределах 0,00005-0,001, остальное алюминий (х – обрыв полосы)

Коэффициент трения при прокатке (ПРВ) рассчитывали по формуле Экелунда – Павлова (Ю. Файнберга) ( $l_d / h_{cp} > 3$ ):

$$f = \frac{0,5 \cdot \alpha}{1 - 2\gamma/\alpha}; \quad (5)$$

$$\gamma = \sqrt{S \cdot h / R \cdot 100}, \quad (6)$$

где  $s$  – величина опережения;  $h$  – толщина полосы после прокатки;  $R$  – радиус валков.

При волочении в холостых валках (ПВ) коэффициент  $f_{ПВ}$  рассчитывали без учета влияния сил трения в подшипниках качения при  $f_{ш} = 0,003$  по формуле

$$f_{ПВ} = T_{ПВ} / 2P, \quad (7)$$

где  $T_{ПВ}$  – усилие прокатки-волочения;  $P$  – усилие, действующее на валки.

Экспериментальные и расчетные данные исследований представлены в табл.1 и на рис.1-3. Из рис.2,а следует, что величины опережений при прокатке и прокатке – волочении в неприводных валках существенно различаются.

В условиях прокатки в приводных валках (кривые 1,2) величины опережений при максимальных обжатиях  $\varepsilon \approx 0,47$  находятся в пределах  $S=4,2-4,4\%$ .

Большие значения, для практически одинаковых диаметров валков, соответствуют валку с большей шероховатостью поверхности, что согласуется с данными [8].

Для условий прокатки в приводных валках (ПРВ) с  $\varepsilon \geq 0,2$  отношение  $\gamma/\alpha$  изменяется от  $\gamma/\alpha=0,383$  до  $\gamma/\alpha=0,248$ . При прокатке- волочении полосы в холостых валках (ПВ) для  $\varepsilon < 0,1$  величины опережений на шероховатых валках (кривые 2, 4) практически совпадают, а на гладких валках (кривые 1, 3) существенно отличаются. При  $\varepsilon > 0,15$  величины опережений при прокатке-волочении полос значительно выше, чем при прокатке и для  $\varepsilon \geq 0,4$  составляют  $S=24,2-29,5\%$  (кривые 3, 4).

Таблица 1

h, мм	ε, %	b, мм	P, кН	p <sub>ср</sub> , МПа	T <sub>ПВ</sub> , кН	σ <sub>н</sub> , МПа	S, %		f	f <sub>ПВ</sub>
							верх	низ		
Прокатка в приводных валках										
1,02	4,67	23,50	2,03	74,6	-	-	1,1	2,2	-	-
0,98	8,41	23,55	2,83	77,3	-	-	2,2	2,2	-	-
0,93	13,08	23,60	4,29	93,8	-	-	2,6	2,9	-	-
0,87	18,69	23,55	6,71	123,1	-	-	2,7	2,7	-	-
0,80	25,23	23,50	7,65	121,8	-	-	3,0	3,4	-	-
0,75	29,91	23,45	9,53	140,0	-	-	4,0	4,3	0,148	-
0,70	34,58	23,60	10,93	148,7	-	-	3,7	4,1	0,131	-
0,65	39,25	23,65	11,40	145,5	-	-	3,8	4,3	0,128	-
0,62	42,06	23,60	12,26	151,5	-	-	4,1	4,3	0,127	-
0,56	47,66	23,75	13,20	152,6	-	-	4,2	4,4	0,124	-
Волочение полос в неприводных валках										
0,99	7,48	23,40	1,79	54,2	0,250	10,6	3,9	3,6	-	0,076
0,94	12,15	23,30	2,50	67,3	0,400	17,9	5,5	3,8	-	0,080
0,90	15,89	23,30	3,75	78,3	0,575	26,9	6,4	4,2	-	0,075
0,85	20,56	23,30	4,92	85,1	0,755	37,4	9,5	7,5	-	0,077
0,79	26,17	23,35	5,70	91,7	0,975	51,9	15,4	8,9	-	0,085
0,71	33,64	23,35	6,56	92,7	1,250	74,0	22,5	14,2	-	0,094
0,67 <sup>1)</sup>	37,38	23,40	6,87	93,3	1,300	81,3	24,3	17,7	-	0,095
0,62 <sup>2)</sup>	42,06	23,40	7,09	92,3	1,480	100,1	29,5	24,2	-	0,104
0,565 <sup>3)</sup>	47,20	22,35	7,34	87,8	1,575	122,4	-	-	-	0,107

Результаты экспериментов по прокатке и прокатке- волочению полос из алюминия  
Примечание: 1) – появление линий течения Людерса; 2) – обрыв полосы в конце протягивания; 3) – обрыв полосы в начале протягивания.

Во всех случаях опережение со стороны гладкого валка (с меньшей шероховатостью) несколько больше, чем со стороны шероховатого, что свидетельствует о меньшей его скорости вращения [см. выражение (4)] вследствие больших величин микропроскальзываний на контакте полосы с валком. Для данного очага деформации ше-

роховатый валок (0,97мкм  $Ra$ ) является “приводным” для гладкого валка (0,45мкм  $Ra$ )[7,8].

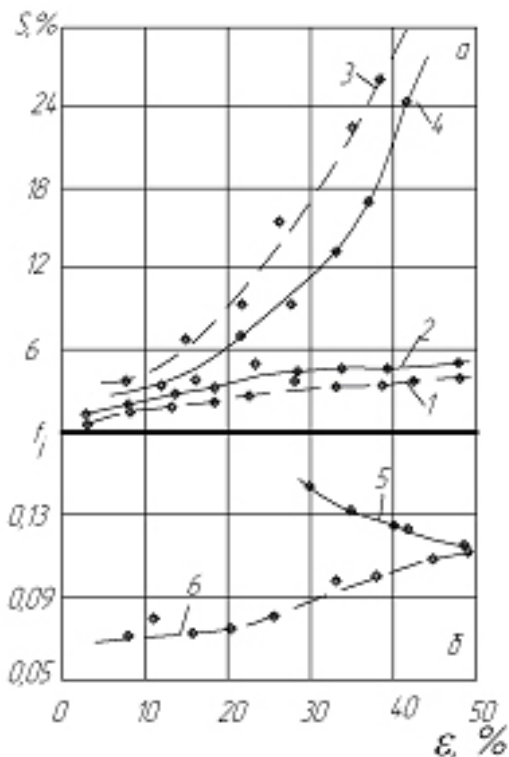


Рис.2. Изменение опережения (а) и коэффициента трения (б) в зависимости от относительного обжатия при прокатке (1, 2, 5) и прокатке-волочении (3, 4, 6) со стороны гладкого (1, 3) (верх) и шероховатого (2, 4) (низ) валков: ( $D_B \approx 51,9$ мм,  $D_H \approx 51,8$ мм,  $H=1,07$ мм; шероховатость валков  $Ra$ , мкм: верх – 0,45; низ – 0,97; смазка – масло индустриальное ИС-20)

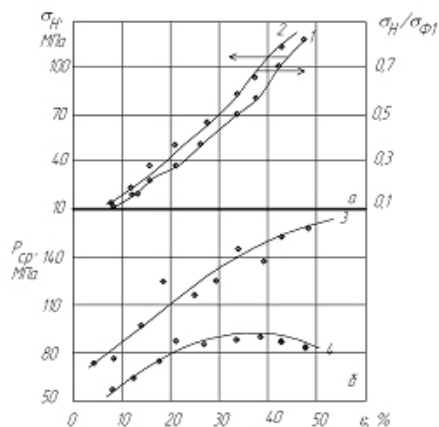


Рис.3. Изменение напряжения натяжения  $\sigma_H$  (1) и коэффициента  $\sigma_H/\sigma_{\Phi 1}$  (2) (а) и среднего нормального контактного напряжения  $p_{ср}$  (3, 4) (б) в зависимости от относительного обжатия: 3 – прокатка; 1, 2, 4 – прокатка-волочение в неприводных валках ( $D \approx 51,82$ мм,  $H=1,07$ мм; шероховатость валков  $Ra$ , мкм: верх – 0,45; низ – 0,97; смазка – масло индустриальное ИС-20)

Напряжение натяжения  $\sigma_H$  рассчитывали по выражению  $\sigma_H = T_{\text{лб}} / h \cdot b$ ,

где  $h$  и  $b$  – толщина и ширина полосы после деформации соответственно.

Напряжение протягивания при прокатке-волочении полосы в неприводных валках (ПВ) (кривые 1, 2) обусловлено сопротивлением течению металла в очаге деформации. Чем больше величина обжатия, тем больше значения  $\sigma_H$  и  $\sigma_H/\sigma_{\Phi 1}$ . При обжатиях  $\varepsilon < 0,15$  сопротивление течению металла в холостых валках несколько меньше, чем при прокатке в приводных валках и при этом нормальные контактные напряже-

Расчеты по выражениям (5) – (7) показали, что величины, коэффициентов трения отличаются (рис.2,б). При прокатке в приводных валках (точки 5) коэффициент трения  $f$  несколько снижается, а при прокатке-волочении (точки 6) коэффициент трения  $f$  увеличивается с увеличением относительного обжатия вследствие уменьшения толщины слоя смазки. Это согласуется с известными данными [8].

На рис.3 представлены зависимости, отражающие влияние относительного обжатия на характер изменения нормального контактного напряжения  $p_{ср}$  в процессах прокатки в приводных валках и прокатки-волочения в неприводных валках.

ния  $p_{cp}$  при прокатке-волочении существенно меньше – на 21-32% (кривые 3, 4). Очевидно, в тех условиях деформации полос, когда относительное обжатие не превышает  $\varepsilon=0,1 - 0,15$  целесообразно вместо процесса прокатки (дрессировка) применять процесс волочения в валках с отключенным приводом (то есть в холостых валках). При прокатке-волочении с обжатием  $\varepsilon=0,3 - 0,4$  среднее нормальное контактное напряжение  $p_{cp}$  на 32-36% ниже, чем при прокатке. Однако при прокатке-волочении с  $\varepsilon=37,38\%$  на готовой полосе в процессе протягивания образуются линии течения (линии Людерса), а при обжатиях  $\varepsilon \geq 42,06$  происходит обрыв полосы после выхода ее из валков. В этих условиях отношение  $\sigma_H/\sigma_{Ф1} \geq 0,8$  (кривая 2).

Из рис.1 и 3, б следует, что при прокатке в приводных валках среднее нормальное контактное напряжение  $p_{cp}$  (рис.3, б) во всем диапазоне обжатий превышает величины напряжения течения металла  $\sigma_T$  (рис.1), особенно при  $\varepsilon > 0,3$ . Это свидетельствует о существовании в очаге деформации объемного напряженного состояния. При прокатке-волочении в неприводных валках значения среднего нормального контактного напряжения  $p_{cp}$  во всем диапазоне обжатий меньше напряжения течения  $\sigma_T$  на выходе из валков и меньше среднего нормального контактного напряжения при прокатке (см. рис.1 и рис.3, б). Это обусловлено преобладающим влиянием в очаге деформации напряжений продольного растяжения, которые нивелируют действие продольных подпирющих напряжений  $\sigma_3$  от контактных касательных напряжений.

**Выводы.** Выполнены исследования изменения опережения и средних нормальных контактных напряжений при прокатке полос в приводных валках и в процессе прокатки – волочения полос в холостых валках. Установлено, что при прокатке – волочении величины опережений существенно больше (до  $S=24,2-29,5\%$  при  $\varepsilon \approx 0,4$ ), чем в приводных валках ( $S=4,1-4,4\%$  при  $\varepsilon \approx 0,42-0,47$ ). В приводимых экспериментах процесс ПВ осуществляется устойчиво при обжатиях  $\varepsilon \leq 0,3$  и обеспечивается получение полосы с качественной поверхностью. При обжатии  $\varepsilon \geq 0,37$  появляются линии течения Людерса и происходит разрыв полос после валков вследствие больших растягивающих напряжений.

В реальных условиях осуществление процесса ПВ при  $\varepsilon \leq 0,3$  по сравнению с прокаткой в приводных валках (ПРВ) обеспечивает снижение нормальных контактных напряжений в пределах 30-34%. Процесс ПВ может быть использован при деформации полос с небольшими обжатиями.

**Список литературы:** 1. Теория волочения./Перлин И.Л., Ерманок М.З. -М.: Металлургия, 1971.-448с. 2. Анализ влияния коэффициента внешнего трения на параметры процесса волочения в роликовых волоках / Добров И.В. // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. МОНУ, НМАУ.- Дніпропетровськ, 2005, №8.-С.131-135. 3. Добров И.В., Сравнительный анализ процессов прокатки и волочения в роликовых волоках / Добров И.В., Грудев А.П., Коковихин Ю.В // Изв. вузов. Черная металлургия, 1987, №10.-С.44-48. 4. Прокатка на многовалковых станах / П.И. Полухин, В.П. Полухин, А.Ф. Пименов и др. – М.: Металлургия, 1981.-248с. 5. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология)./ Гарбер. Э.А. – М.: ОАО “Черметинформация”; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004.-416с. 6. Непрерывная прокатка сортовой стали / А.П. Лохоматов, С.М. Жучков, Л.В. Кулаков и др.-К.: Наукова думка, 1998.-239с. 7. Определение кинематических и энергосиловых параметров прокатки при одновалковом приводе /Николаев В.А.// Изв. вузов. Черная металлургия, 1993, №1.-С.34-37. 8. Теория и практика процессов прокатки /Николаев В.А.-Запорожье, ЗГИА, 2002.-232с. 9. Оценка методов определения коэффициента трения при волочении /Николаев В.А., Васильев А.Г. // Изв. вуз. Черная металлургия, - 1991, №7.-С.48-50. 10. Николаев В.А. Несимметричная тонколистовая прокатка / Николаев В.А., Скороходов В.Н, Полухин В.П.-М.: Металлургия, 1993.-192с.